

10.07

PCT/DE 00/03143

BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND

10-088044

**PRIORITY  
DOCUMENT**

SUBMITTED OR TRANSMITTED IN  
COMPLIANCE WITH RULE 17.1(a) OR (b)



REC'D 24 NOV 2000	
WIPO	PCT

DE00/3143

**Prioritätsbescheinigung über die Einreichung  
einer Patentanmeldung**

E.V.

**Aktenzeichen:** 199 45 015.3

**Anmeldetag:** 20. September 1999

**Anmelder/Inhaber:** Siemens AG, München/DE

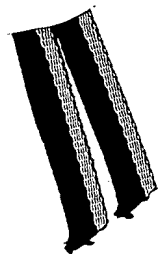
**Bezeichnung:** Verfahren, Anordnung und Computerprogramm-  
Erzeugnis zur Simulation eines technischen Systems

**IPC:** G 06 F, G 05 B

Die angehefteten Stücke sind eine richtige und genaue Wiedergabe der  
ursprünglichen Unterlagen dieser Patentanmeldung.

München, den 27. September 2000  
Deutsches Patent- und Markenamt  
Der Präsident  
Im Auftrag

Dzierzon



THIS PAGE BLANK (USPTO)

---



GR 99 P 2862

1

## Beschreibung

### Verfahren, Anordnung und Computerprogramm-Erzeugnis zur Simulation eines technischen Systems

Die Erfindung betrifft ein Verfahren, eine Anordnung und ein Computerprogramm-Erzeugnis zur Simulation eines technischen Systems.

Zu einer Optimierung eines technischen Systems, insbesondere zu einer globalen Optimierung, sind verschiedene Ansätze bekannt [1]. Handelt es sich bei dem zu optimierenden System um ein komplexes, analytisch kaum bzw. überhaupt nicht beschreibbares Gebilde, so wird häufig eine Simulation für eine bestimmte Auslegung des technischen Systems durchgeführt. Bei einer solchen Simulation wird abhängig von einer Vielzahl von Einstellparametern eine Auslegung bzw. eine Reaktion des technischen Systems errechnet. Durch eine Vielzahl von Einstellparametern und eine immense Anzahl an Rechenoperationen, die aus den Belegungen der Einstellparameter die Auslegung des technischen Systems für diese Einstellparameter ermittelt, ist ein gewaltiger Rechenaufwand notwendig. Faßt man alle möglichen interessierenden Einstellparameter in einen sogenannten Parametervektor  $x$  zusammen, so ergibt sich für jede Belegung dieses Parametervektors in einer Dimension  $n$  eine Simulationsantwort  $y$  der Dimension  $m$ .

Im Rahmen der (globalen) Optimierung wird hinsichtlich einer Zielfunktion  $f$  eine möglichst gute Auslegung bzw. Einstellung des technischen Systems ermittelt. Nun können aber zusätzlich zu den für das technische System vorgesehenen Einstellparametern, die im Laufe einer Optimierungsrechnung variiert werden können, noch sogenannte Einstellkonstanten auftreten, die entsprechend während der Optimierungsrechnung nicht variiert werden können und daher keine Variablen (=Veränderlichen) im Sinne der Optimierung sind. Dennoch sind diese Einstellkonstanten von großer Bedeutung, da sie Einfluß auf die Zielfunktion haben. Ein Beispiel für derartige Einstellkonstanten sind Kostenkonstanten, die unter Umständen im Laufe der Zeit mehr oder minder stark variieren. Ab einer gewissen Veränderung der Kostenkonstanten ergibt sich im Rahmen der Optimierung, falls Kosten in die Zielfunktion eingehen, ein verändertes Ergebnis. Nun ist es von großem Nachteil, bei Veränderung der Kostenkonstanten erneut die Simulation, wie oben beschrieben, zu durchlaufen und damit erneut den gewaltigen Rechenaufwand zu verursachen.

Die **Aufgabe** der Erfindung besteht darin, eine Simulation eines technischen Systems zu ermöglichen, ohne daß unnötige zeitaufwendige Simulationsschritte mehrfach ausgeführt werden müssen.

Diese Aufgabe wird gemäß den Merkmalen der unabhängigen Patentansprüche gelöst. Weiterbildungen ergeben sich auch aus den abhängigen Ansprüchen.

Zur Lösung der Aufgabe wird ein Verfahren zur Simulation eines technischen Systems angegeben, bei dem eine Zielfunktion von Parametern und vorgegebenen Einstellungskonstanten abhängt. Abhängig von einer vorgegebenen Belegung der Parameter wird anhand einer Anfrage an eine externe Quelle ein Ergebnis in Form eines Einflusses der Parameter auf das technische System bestimmt. Das Ergebnis wird zwischengespeichert. Anhand des Ergebnisses und der Einstellkonstanten wird das technische System simuliert.

Hierbei ist es insbesondere von Vorteil, daß die Ermittlung des Wertes der Zielfunktion aufgeteilt wird in die Ermittlung des Einflusses der Parameter auf das technische System und eine Bestimmung des Einflusses der Einstellungskonstanten auf das technische System. Somit ist es möglich, die zeitaufwendige und rechenintensive Anfrage an die externe Quelle dahingehend zu optimieren, daß insbesondere einmal bestimmte Ergebnisse für weitere Simulationszwecke wiederverwendbar sind.

Eine Weiterbildung besteht darin, daß anhand der Simulation ein Entwurf des technischen Systems durchgeführt wird. Insbesondere kann dabei

- ein Neuentwurf,
- eine Anpassung,
- eine Auslegung oder
- eine Steuerung

des technischen Systems erfolgen. Bei dem Neuentwurf handelt es sich bevorzugt um eine Neuschaffung des technischen Systems, zum Beispiel einer Anlage der Verfahrenstechnik, einer Schaltung oder eines Softwaresystems. Die Anpassung umfaßt eine Veränderung eines bestehenden Systems, zum Beispiel im Hinblick auf einen verbesserten Betrieb. Auslegung kann sowohl eine Dimensionierung oder eine Einstellung von Komponenten, zum Beispiel physikalischer Abmessungen von Teilen eines technischen Systems, sein. Schließlich ermöglicht die Steuerung eine effiziente Einstellung der veränderbaren Parameter des Systems, so daß insbesondere ein möglichst effizienter Betrieb gewährleistet sein kann.

Eine Ausgestaltung besteht darin, daß eine erneute Bestimmung des Einflusses der Parameter auf das technische System durch Zugriff auf das zwischengespeicherte Ergebnis bestimmt wird. Durch diesen Schritt der Zwischenspeicherung werden deutlich Rechenleistung und Zeit eingespart.

Eine andere Weiterbildung besteht darin, daß für eine Vielzahl von Belegungen der Parameter jeweils deren Einfluß auf das technische System durch Anfrage an die externe Quelle ermittelt und das Ergebnis dieser Anfrage zwischengespeichert werden. Hierbei ist es von Vorteil, daß bei mehreren Anfragen mehrere Ergebnisse resultieren, deren Zwischenspeichern eine (mehrdimensionale) Ebene in einem (mehrdimensionalen) Raum bestimmt. Diese Ebene ist umso genauer bestimmt, je mehr Anfragen an die externe Quelle (z.B. den Simulator) gerichtet werden. Ist die Ebene hinreichend genau bestimmt, d.h. hat sie ausreichend viele Stützstellen, so können weitere (mehrdimensionale) Punkte auf dieser Ebene auch ohne Anfrage durch Interpolation oder Extrapolation ermittelt werden. Ein derartiges Verfahren der Inter-/Extrapolation ist in der Regel wesentlich weniger zeit- und rechenintensiv als die Bestimmung mittels Simulator.

Auch ist es eine Weiterbildung, daß zunächst mehrere Ergebnisse bestimmt und zwischengespeichert werden. Daraufhin können zusätzliche Punkte ohne erneute Anfrage an die externe Quelle mittels eines neuronalen Netzes bestimmt werden, wobei dem neuronalen Netz die gespeicherten Ergebnisse als eine Trainingsmenge bereitgestellt werden. Ein solches neuronales Netz kann insbesondere als ein Mehrschichten-Perzeptron (siehe [2]) ausgeführt sein.

Die Anfrage an die externe Quelle kann insbesondere dergestalt sein, daß die externe Quelle selbst ein aufwendiges Simulationsprogramm darstellt, anhand dessen, abhängig von der Belegung der Parameter, ein Ergebnis der Auslegung bzw. näheren Beschreibung der technischen Anlage berechnet wird. Eine Alternative besteht darin, daß die Anfrage an die externe Quelle durch ein Experiment befriedigt wird.

Eine andere Ausgestaltung besteht darin, daß die Simulation mit einer Vielzahl von Ergebnissen ohne eine erneute Anfrage an die externe Quelle durchgeführt wird. Insbesondere kann mit der zwischengespeicherten mehrdimensionalen Beschreibung der bereits ermittelten Ergebnisse auf erfolgte Anfragen eine weitere Simulation durchgeführt werden, ohne daß es des aufwendigen Mechanismus der Bestimmung von Ergebnissen in Form der externen Quelle bedarf.

Eine zusätzliche Ausgestaltung besteht darin, daß das oben beschriebene Verfahren zur Simulation eines technischen Systems im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse eingesetzt wird. Dabei wird die Sensitivität der Optima (der

einstellbaren Parameter) gegenüber Veränderungen der vorgegebenen Einstellungskonstanten ermittelt.

Ferner wird zur Lösung der Aufgabe eine Anordnung zur Simulation eines technischen Systems angegeben, bei der eine Prozessoreinheit vorgesehen ist, die derart eingerichtet ist, daß

1. eine Zielfunktion von Parametern und vorgegebenen Einstellungskonstanten abhängt;
2. abhängig von einer vorgegebenen Belegung der Parameter anhand einer Anfrage an eine externe Quelle ein Ergebnis in Form eines Einflusses der Parameter auf das technische System bestimmbar ist;
3. das Ergebnis zwischenspeicherbar ist;
4. anhand des Ergebnisses und der Einstellungskonstanten das technische System simulierbar ist.

Außerdem wird ein Computerprogramm-Erzeugnis zur Lösung der Aufgabe angegeben, welches zur Simulation eines technischen Systems vorgesehen ist, und bei Ausführung auf einer Prozessoreinheit die folgenden Schritte umfaßt:

1. eine Zielfunktion hängt von Parametern und vorgegebenen Einstellungskonstanten ab;
2. abhängig von einer vorgegebenen Belegung der Parameter anhand einer Anfrage an eine externe Quelle wird ein Ergebnis in Form eines Einflusses der Parameter auf das technische System bestimmt;
3. das Ergebnis wird zwischengespeichert;
4. anhand des Ergebnisses und der Einstellungskonstanten wird das technische System simuliert.

---

Die Anordnung sowie das Computerprogramm-Erzeugnis sind insbesondere geeignet zur Durchführung des erfindungsgemäßen Verfahrens oder einer seiner vorstehend erläuterten Weiterbildungen.

Ausführungsbeispiele der Erfindung werden nachfolgend anhand der Zeichnungen dargestellt und erläutert.

Es zeigen

- Fig.1** ein Verfahren zur Simulation eines technischen Systems;  
**Fig.2** ein Verfahren zur Simulation eines technischen Systems mit einer Zwischenspeicherung;  
**Fig.3** ein Verfahren zur Simulation eines technischen Systems mit einer automatisierten Gitterabtastung;  
**Fig.4** ein Verfahren zur Simulation mit Nutzung einer Simulationsdatenbank;  
**Fig.5** eine Prozessoreinheit.

In Fig.1 ist ein Verfahren zur Simulation eines technischen Systems, insbesondere eines Kraftwerks, dargestellt. Eine Zielfunktionsauswertung 102 hängt ab von Ergebnissen einer externen Quellen, hier einem externen Simulator 106, der über eine Schnittstelle „Kraftwerksanbindung“ 105 angebunden ist. Ferner hängt die Zielfunktionsauswertung 102 von Einstellungskonstanten, hier Kostenkonstanten 103 ab. Es ergibt sich somit folgender Zusammenhang:

$$f_{\alpha,\beta,\dots}(\mathbf{x}) = F_{\alpha,\beta,\dots} \circ \underbrace{\phi(\mathbf{x})}_{\mathbf{y} \in \mathbb{R}^{n+m}}, \mathbf{x} \in \mathbb{R}^n. \quad (1)$$

Hierbei bezeichnet  $f$  die Zielfunktion, die von den Kostenkonstanten  $\alpha, \beta, \dots$  abhängt und aufgespalten wird in einen Anteil  $F$ , in den die Kostenkonstanten einfließen und in einen Anteil  $\phi$ , der die Parameter  $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$  umfaßt, die im Rahmen der Optimierung beeinflusbar sind. Das Zeichen „ $\circ$ “ bedeutet in obiger Formel (1) eine nacheinander-Ausführung zweier Funktionen.

In einer Optimierung 101 erfolgt eine (globale) Optimierung der von der Zielfunktionsauswertung 102 bereitgestellten Zielfunktion  $f$ . Das Ergebnis der Optimierung 101 dient insbesondere für eine neue Eingabe in die Zielfunktion, so daß unter Berücksichtigung der Kostenkonstanten 103 eine erneute Optimierung 101 erfolgen kann. Insbesondere wird dieses Verfahren solange iteriert, bis eine vorgegebene Güte erreicht wurde oder eine weitergehende Verbesserung zwischen den letzten Iterationen nicht signifikant ist. Vorzugsweise werden Ergebnisse der Zielfunktionsauswertung 102 in einer Protokolldatei 104 abgespeichert.

Fig.2 erweitert Fig.1 derart, daß eine Simulationsschnittstelle 201 mit einer Simulationsdatenbank 202 eingefügt ist. Die Simulationsschnittstelle 201

bewirkt, daß das Ergebnis jeder Anfrage an die externe Quelle, hier über die Kraftwerksanbindung 105 und den Simulator 106, in der Simulationsdatenbank zwischengespeichert wird. Sollte zu einem späteren Zeitpunkt die gleiche Anfrage an den Simulator 106 vorliegen, so muß dieser nicht noch einmal den zeitaufwendigen Berechnungsvorgang starten, sondern es kann direkt auf die bereits in der Simulationsdatenbank 202 abgespeicherten Ergebnisse zugegriffen werden. Hierbei ist zu bemerken, daß die Kostenkonstanten 103 in der Zielfunktionsauswertung 102 mit dem Ergebnis der Anfrage verrechnet werden. Diese Aufgliederung der Zielfunktion gemäß Gleichung (1) stellt sicher, daß auch bei einer Veränderung der Kostenkonstanten eine schnelle und effiziente Berechnung (und Optimierung) der Zielfunktion möglich ist, wobei für die bereits ermittelten Belegungen der Parameter  $x$  nicht erneut der Simulator 106 angestoßen werden muß.

In Fig.3 ist ein automatisiertes Verfahren zur systematischen Belegung der Simulationsdatenbank 202 gezeigt. Mit einer Gitterabtastung 301 ist es möglich, für ausgezeichnete (mehrdimensionale) Punkte  $x$  im Raum der Parameter gezielt über die Simulationsschnittstelle 201, die Kraftwerksanbindung 105 und den Simulator 106 Ergebnisse  $y$  zu ermitteln und diese Ergebnisse in der Simulationsdatenbank abzuspeichern. Der Vorteil besteht darin, daß anhand der systematisch bestimmten Punkte ein „Gitter“ entsteht, das – je nach Anwendungsfall – mehr oder weniger dicht ist. Mit diesem Gitter können Zwischenwerte durch Interpolation oder Extrapolation bestimmt werden, ohne daß dadurch eine Anfrage an den Simulator 106 notwendig wäre. Es ergibt sich also mit dem Gitter eine Grundstruktur, die bei der weiteren Optimierung, auch ohne den Simulator 106, hilfreich sein kann.

Fig.4 zeigt den Fall nach der abgeschlossenen Gitterabtastung. Hier ist der Simulator 106 nicht länger notwendig (angedeutet durch die unterbrochene Verbindungslinie 402). So kann bspw. ohne Anbindung an den Simulator 106 und ohne dessen zeitaufwendige Berechnungen eine Simulation bzw. Optimierung erfolgen. Ein Block 401 kennzeichnet die Auswertung der in der Simulationsdatenbank gesammelten und/oder inter-/extrapolierten Ergebnisse.

---

## Auslegungsoptimierung von Kraftwerken

Bei der Auslegungsoptimierung von Gas-und-Dampf-Kraftwerken (GuD-Kraftwerke) werden Auslegungspunkte gesucht, die zu minimalen Stromerzeugungskosten führen. Die Stromerzeugungskosten bilden die Zielfunktion  $f$ , deren Minimum gesucht ist. Nun hängen die Stromerzeugungskosten nicht



nur von den auszulegenden Größen des Kraftwerks (=Parameter, Einstellparameter), die im folgenden zum Variablenvektor  $\mathbf{x}$  zusammengefaßt sind, ab. Vielmehr gehen in diesen funktionalen Zusammenhang eine Reihe von Einstellungskonstanten (hier: Kostenkonstanten, Kostenparameter; z.B. Steigungen von Kostenkurven) ein. Je nach Wert dieser Kostenkonstanten ergeben sich unter Umständen andere Auslegungsoptima  $\mathbf{x}_{opt}$  für das technische System, hier das GuD-Kraftwerk.

Nun sind die Werte dieser Kostenkonstanten

- a) in den meisten Fällen nicht exakt ermittelbar, d.h. mit einer (meist nur grob abschätzbaren) Unsicherheit behaftet,

und

- b) in einigen Fällen (z.B. Brennstoffpreis) nicht universell für alle derzeitigen Kraftwerkangebote gültig, sondern regional verschieden.

Zur Beurteilung eines Auslegungsoptimums ist es wichtig, abschätzen zu können, ob dieses Auslegungsoptimum, das unter Annahme eines bestimmten Wertes  $k_0$  (im weiteren als Hauptwert bezeichnet) des Kostenparameters  $k$  ermittelt wurde und das daher mit  $\mathbf{x}_{k_0}$  bezeichnet wird, auch noch für benachbarte Werte  $k_0 \pm \Delta k$  optimal ist. Diese **Sensitivität des Auslegungsoptimums gegenüber der Variation von Kostenparametern** zu ermitteln wird nachfolgend eingehend beschrieben.

Dabei werden zwei Aspekte untersucht:

- 1) Wie verändert sich das Auslegungsoptimum, wenn ein Kostenparameter um seinen Hauptwert  $k_0$  herum um 50% nach unten und nach oben variiert wird?

Würde man den Kostenparameter  $k$  kontinuierlich variieren, so erhielte man als Antwort auf diese Frage eine durch  $k$  parametrisierte Kurve  $\mathbf{x}_k$  von Auslegungsoptima.

- 
- 2) Wie oben skizziert, hängen die Stromerzeugungskosten  $f$  von den Auslegungsgrößen  $\mathbf{x}$  und von dem Wert des Kostenparameters  $k$  ab:

$$f = f(\mathbf{x}, k)$$

(Zur Vereinfachung wird hier nur ein Kostenparameter  $k$  dargestellt). Die unter 1) beschriebene Untersuchung liefert eine funktionale Abhängigkeit der Stromerzeugungskosten von dem Kostenparameter  $k$ ,

die sich ergibt, wenn für jeden aktuellen Wert von  $k$  die an  $k_{\text{aktuell}}$  angepasste Auslegung  $\mathbf{x}_{k_{\text{aktuell}}}$  gewählt wird:

$$f_{\text{opt}}(k_{\text{aktuell}}) := f(\mathbf{x}_{k_{\text{aktuell}}}, k_{\text{aktuell}}).$$

In vielen Fällen ist aber eine Anpassung der Auslegung  $\mathbf{x}$  an den Wert des Kostenparameters  $k$  nicht erwünscht, sondern die für den Hauptwert  $k_0$  optimierte Auslegung  $\mathbf{x}_{k_0}$  soll auch unter veränderten Kostenbedingungen, also für ein ganzes Werte-Intervall

$$[k_0 - \Delta k, k_0 + \Delta k]$$

des Kostenparameters  $k$ , beibehalten werden. Bei dieser Vorgehensweise erhält man eine andere funktionale Abhängigkeit der Stromerzeugungskosten vom Wert

$$k_{\text{aktuell}} : f_{\mathbf{x}_{k_0}}(k_{\text{aktuell}}) := f(\mathbf{x}_{k_0}, k_{\text{aktuell}}).$$

Naturgemäß hat ein solches Festhalten an der Auslegung  $\mathbf{x}_{k_0}$  zur Folge, daß bei einem tatsächlichen Wert  $k_{\text{aktuell}}$  ein gewisses Optimierungspotential ungenutzt bleibt. Dieses Optimierungspotential entspricht den mit einer Standardauslegung  $\mathbf{x}_{k_0}$  verbundenen Mehrkosten und wird daher (als Funktion von  $k_{\text{aktuell}}$ ) quantifiziert durch

$$f_{\mathbf{x}_{k_0}}(k_{\text{aktuell}}) - f_{\text{opt}}(k_{\text{aktuell}}).$$

Die nähere Untersuchung der genannten Aspekte beruht auf folgender Vorgehensweise:

- (i) Zur Bestimmung einer „Standardauslegung“  $\mathbf{x}_{k_0}$  wurden sämtliche Kostenparameter auf ihren Hauptwert  $k_0$  gesetzt.  $\mathbf{x}_{k_0}$  ist der Minimierer der Zielfunktion (= Stromerzeugungskosten)  $f(\mathbf{x}, k_0)$  [bei festgehaltenem  $k_0$ ].
- (ii) Jeder einzelne der als relevant identifizierten Kostenparameter wird untersucht. Dabei werden jeweils alle anderen Kostenparameter auf ihrem Hauptwert festgehalten, während der zu untersuchende Parameter,  $k$  genannt, innerhalb eines symmetrisch um seinen Hauptwert  $k_0$  angeordneten Intervalls

$$[k_0 - \Delta k, k_0 + \Delta k]$$

in kleinen Schritten  $\delta k$  abgestuft wird:

$$k_{\text{aktuell}} = k_0 - \Delta k, k_0 - \Delta k + \delta k, k_0 - \Delta k + 2 \cdot \delta k, \dots, k_0, \dots, k_0 + \Delta k.$$

Die Intervallbreite wird (für fast alle untersuchten Parameter  $k$ ) zu

$$\Delta k = 50\% \cdot k_0,$$

die Raster-Schrittweite zu

$$\delta k = 5\% \cdot k_0$$

gewählt.

Für jeden der Rasterwerte  $k_{\text{aktuell}}$  wird der folgende Schritt (iii) durchgeführt.

- (iii) Bestimme die an  $k_{\text{aktuell}}$  angepasste optimale Auslegung  $\mathbf{x}_{k_{\text{aktuell}}}$  durch Minimierung der Zielfunktion (= Stromerzeugungskosten)  $f(\mathbf{x}, k_{\text{aktuell}})$  [bei festgehaltenem  $k_{\text{aktuell}}$ ]. Berechne durch Einsetzen von  $\mathbf{x}_{k_{\text{aktuell}}}$  bzw. von  $\mathbf{x}_{k_0}$  in die Zielfunktion  $f(\cdot, k_{\text{aktuell}})$  die Werte  $f_{\text{opt}}(k_{\text{aktuell}})$  bzw.  $f_{\mathbf{x}_{k_0}}(k_{\text{aktuell}})$ .

Die Abfolge der Punkte  $\mathbf{x}_{k_{\text{aktuell}}}$  für alle Rasterschritte des  $k$ -Intervalls ist eine diskretisierte Version der gesuchten Kurve  $\mathbf{x}_k$  von Auslegungsoptima [siehe Aspekt 1)].

Analog stellt die Abfolge der Differenzen  $f_{\text{opt}}(k_{\text{aktuell}}) - f_{\mathbf{x}_{k_0}}(k_{\text{aktuell}})$  eine diskretisierte Version der Funktion „Mehrkosten beim Festhalten an der Standardauslegung  $\mathbf{x}_{k_0}$ “ (in Abhängigkeit von  $k_{\text{aktuell}}$ ) dar [siehe Aspekt 2)].

Ein Beispiel aus der Praxis zeigt, daß im Rahmen der Kraftwerksoptimierung mit 25 zu untersuchenden Kostenparameter bei jeweils 20 Rasterstufen insgesamt gemäß Schritt (iii) 500 Optimierungsrechnungen zur Ermittlung von  $\mathbf{x}_{k_{\text{aktuell}}}$  durchzuführen sind. Angesichts des Rechenzeitbedarfs pro Auslegungsoptimierung von ca. 1 Tag, der durch die zahlreichen (einige 100) dafür benötigten Anfragen an den Simulator 106 entsteht, ist es wenig ökonomisch, für Schritt (iii) jeweils im vollen reellwertigen Raum der Auslegungsvariablen zu optimieren. Als Ausweg wurde eine Diskretisierung des Suchraums vorgenommen, die nachfolgend erläutert wird.

---

## Gitterkonzept

### Bestimmung der unabhängigen Freiheitsgrade

Resultate von Optimierungsrechnungen wie auch Höhenlinienplots der Zielfunktion für ausgewählte Schnittebenen durch diesen hochdimensionalen Variablenraum legen die Schlußfolgerung nahe, daß die Auslegungsoptima in

dem oben definierten Variablenraum keine isolierten Punkte sind, sondern eine mehrdimensionale Untermannigfaltigkeit bilden. Dies wiederum ist ein Indiz dafür, daß die Auslegungsvariablen nicht wirklich alle voneinander unabhängig, sondern teilweise durch physikalische Beziehungen miteinander verknüpft sind. Die Zahl der Freiheitsgrade für die Optimierung kann somit reduziert werden.

Wie oben erläutert, soll im Zuge der Sensitivitätsanalyse die Wanderung von Auslegungsoptima berechnet werden. Hierfür werden isolierte Optima statt ganzer Optimums-Mannigfaltigkeiten benötigt. Zur Ermittlung der wirklich unabhängigen Freiheitsgrade bei der GuD-Auslegung werden gezielt weitere Schnittebenen in dem obigen Variablenraum definiert. Die Analyse der Höhenlinienplots der Stromerzeugungskosten auf diesen Schnittebenen führt häufig dazu, daß das globale Optimum der Stromerzeugungskosten – näherungsweise – in einem **reduzierten Suchraum** (d.h. einem Teilraum des oben benannten Variablenraums) liegt.

### Konzept einer Simulationsdatenbank

Jede Auswertung der Zielfunktion  $f(\mathbf{x}, k_{\text{aktuell}})$  wird zweistufig durchgeführt:

- (1) In Abhängigkeit des Wertes  $\mathbf{x}$  der Auslegungsvariablen werden per Anfrage an den Simulator 106 eine ganze Reihe von thermodynamischen und geometrischen Größen berechnet, die eine Auslegung charakterisieren. Diese Größen werden im weiteren zum Vektor  $\mathbf{s}$  der Simulationsdaten zusammengefaßt:  $\mathbf{s} = \mathbf{s}(\mathbf{x})$ .
- (2) Aus den Simulationsdaten  $\mathbf{s}(\mathbf{x})$  wird in Abhängigkeit der Kostenparameterkonstellation  $k_{\text{aktuell}}$  der Wert der Zielfunktion (d.h. der Stromerzeugungskosten) berechnet.

Das Konzept einer Simulationsdatenbank unterteilt die Zielfunktionsberechnung in zwei voneinander unabhängige Programme.

---

**Programm 1** startet für beliebig vorgegebene Variablenpunkte  $\mathbf{x}_i$  jeweils eine Anfrage an den Simulator 106 und speichert die Simulationsergebnisse  $\mathbf{s}(\mathbf{x}_i)$  in der Simulationsdatenbank 202, die vorzugsweise als Datei mit spezifischem Format realisiert ist. Für dieses Programm spielen die Kostenparameter keine Rolle.

**Programm 2** berechnet bei einer gegebenen Kostenparameterkonstellation  $k_{\text{aktuell}}$  für alle in der Simulationsdatenbank 202 hinterlegten Simulationsdaten  $s$  – und damit für alle diesen Simulationsdaten zugrundeliegenden Variablenwerte  $x$  – den Wert der Zielfunktion  $f(x, k_{\text{aktuell}})$ .

In Kombination mit dem Gitterkonzept ergibt sich folgendes Vorgehen:

- Mittels des Programms 1 wird vorab die Simulationsdatenbank mit Gitterpunkten angelegt.
- Für jede durchzuspielende Kostenparameterkonstellation  $k_{\text{aktuell}}$  werden mittels des Programms 2 die Zielfunktionswerte  $f(x, k_{\text{aktuell}})$  aller Gitterpunkte berechnet. Der Gitterpunkt mit dem kleinsten Zielfunktionswert wird als Optimum notiert.

## Bedeutung der Kostenparameter

Die Auslegungsoptimierung erfolgt mit Ziel, die Stromerzeugungskosten zu minimieren:

$$\text{Stromerzeugungskosten} = \frac{\text{Investitionskosten} \cdot \text{Annuität}}{P_{\text{elek,GuD,netto}} \cdot h_{\text{Jahr}}} + \frac{b}{\eta_{\text{GuD}}}.$$

Der Term „Investitionskosten“ setzt sich aus den Kosten der drei von den Auslegungsentscheidungen hauptsächlich betroffenen Einzelgewerke

- Kaltes Ende,
- Dampfturbine,
- Heizflächen des Abhitzeessels und
- den Kosten der summarisch als „Restkraftwerk“ bezeichneten restlichen Kraftwerkteile

---

zusammen:

$$\begin{aligned} \text{Investitionskosten} = & \text{Kosten}_{\text{Kaltes Ende}} + \text{Kosten}_{\text{Turbine}} \\ & + \text{Kosten}_{\text{HZFL,GuD}} + \text{Kosten}_{\text{Restkraftwerk}} \end{aligned}$$

Bei einer weiteren Aufschlüsselung dieser einzelnen Investitionskostenterme werden die Kostenparameter sichtbar, die diese Kostenterme – im Zusammenspiel mit den Auslegungsvariablen – beeinflussen:

### (A) Kaltes Ende

$$\text{Kosten}_{\text{Kaltes Ende}} = \text{Kosten}_{\text{Kühlsystem: Leitungen/Pumpen}} + \text{Kosten}_{\text{Kondensator}} + \text{Kosten}_{\text{Kühlturm}}$$

$$\text{Kosten}_{\text{Kühlsystem: Leitungen/Pumpen}} = \dot{m}_{\text{Kühlwasser}} \cdot \text{Preis}_{\text{kg/s, Kühlwasser}} + \text{Grundpreis}_{\text{Kühlsystem: Leitungen/Pumpen}}$$

$$\text{Kosten}_{\text{Kondensator}} = \text{Fläche}_{\text{Kondensator}} \cdot \text{Preis}_{\text{m}^2, \text{Kondensator}} + \text{Grundpreis}_{\text{Kondensator}}$$

$$\text{Kosten}_{\text{Kühlturm}} = \text{Basisfläche}_{\text{Kühlturm}} \cdot \text{Preis}_{\text{m}^2, \text{Kühlturm}} + \text{Grundpreis}_{\text{Kühlturm}}$$

Die Kosten des Kalten Endes werden also entscheidend von den Werten der drei Kostenparameter

- spezifische Kosten des Kühlsystems ( $\text{Preis}_{\text{kg/s, Kühlwasser}}$ ),
- Preis pro Quadratmeter Kondensatorfläche ( $\text{Preis}_{\text{m}^2, \text{Kondensator}}$ ) und
- Preis pro Quadratmeter Kühlturbasisfläche ( $\text{Preis}_{\text{m}^2, \text{Kühlturm}}$ )

beeinflusst.

### (B) Dampfturbine

Um zu modellieren, wie die Kosten der Dampfturbine von der HD-Temperatur und dem HD-Druck abhängen, wird um einen Referenz-Auslegungspunkt herum linearisiert:

$$\begin{aligned} \text{Kosten}_{\text{Turbine}} = & \text{Kosten}_{\text{Turbine, Referenz}} \\ & \cdot (1 + \text{Korrektursummand}_{\text{Turbine}, \Delta p} \\ & + \text{Korrektursummand}_{\text{Turbine}, \Delta T}) \end{aligned}$$

Korrektursummand<sub>Turbine,ΔT</sub>

$$= \text{KorrTurb}_{\Delta T, \text{Steigung}} \cdot (T_{\text{HD}} - T_{\text{HD,Referenz}})$$

Korrektursummand<sub>Turbine,Δp</sub> =  $\text{KorrTurb}_{\Delta p, \text{Steigung}} \cdot (p_{\text{HD}} - p_{\text{HD,Referenz}})$

Die Turbinenkosten hängen also von den drei Kostenparametern

- Turbinenkosten bei Referenzauslegung ( $\text{Kosten}_{\text{Turbine,Referenz}}$ )
- Temperaturabhängigkeit der Turbinenkosten ( $\text{KorrTurb}_{\Delta T, \text{Steigung}}$ )
- Druckabhängigkeit der Turbinenkosten ( $\text{KorrTurb}_{\Delta p, \text{Steigung}}$ )

ab.

### (C) Heizflächen

Um die Kosten der gesamten Heizflächen einer Multishaft-Anlage zu erhalten, sind die Kosten der Einzelkessel (baugleich) zu summieren:

$$\text{Kosten}_{\text{HZFL,GuD}} = \text{Kosten}_{\text{HZFL,Kessel}} \cdot \text{Anzahl}_{\text{Kessel}}$$

Die Kosten eines Einzelkessels setzen sich zusammen aus

- einem Sockelbetrag, dem Kostenparameter „Sockelbetrags der Heizflächenkosten pro Abhitzeessel ( $\text{Kosten}_{\text{HZFL,fix}}$ )“ und
- den Beiträgen der einzelnen Heizflächen, die von der Heizflächengeometrie, den verwendeten Materialien und den gemäß der Kesselformel bestimmten Wandaufschlägen abhängen.

Die Kosten der einzelnen Heizflächen sind jeweils beeinflusst durch die beiden Kostenparameter

- Grundpreis der Heizflächen pro Quadratmeter ( $\text{Preis}_{\text{HZFL,m}^2}$ ) und
- Preis der Heizflächenrohre pro Kilogramm ( $\text{Preis}_{\text{HZFL,kg}}$ ).

$$\text{Kosten}_{\text{HZFL,Kessel}} = \text{Kosten}_{\text{HZFL,fix}}$$

$$+ \sum_{\text{HZFL } i} \text{Kosten}_{\text{HZFL } i} (\text{Preis}_{\text{HZFL,m}^2}, \text{Preis}_{\text{HZFL,kg}})$$

Sowohl der Quadratmeter-Grundpreis als auch der Kilogramm-Preis sind materialabhängig.

**(D) Restkraftwerk**

Die Kosten des Restkraftwerks können auf zwei unterschiedliche Arten modelliert werden:

- (i) als proportional zur Netto-Gesamtleistung des Kraftwerks;  
Da in der Formel für die Stromerzeugungskosten die Investitionskosten durch die Nettogesamtleistung dividiert werden, ergibt dieser Ansatz lediglich eine für alle Auslegungsvarianten gleiche Konstante, d.h. die Kosten des Restkraftwerks spielen für die Optimierung keine Rolle.
- (ii) als leistungsunabhängiger Sockelbetrag;  
Wählt man diesen Ansatz, spielen die Kosten des Restkraftwerks sehr wohl eine Rolle für die Auslegungsoptimierung, da sich bei einer größeren Kraftwerkleistung der (auf's Jahr umgelegte) Sockelbetrag auf eine größere Anzahl von kWh verteilt.

Gewisse Teile des Restkraftwerks werden treffender durch Ansatz (i), andere durch Ansatz (ii) modelliert, jedoch ist die genaue Aufteilung nur sehr schwer zu ermitteln:

$$\text{Kosten}_{\text{Restkraftwerk}} = \text{Kosten}_{\text{pro } kW} \cdot P_{\text{elek;GuD;netto}} + \text{Kosten}_{\text{Restkraftwerk,konstant}}$$

Als letzte Gruppe von Kostenparametern werden die drei standortspezifischen Parameter

- Annuität,
- jährliche Betriebsstunden ( $h_{\text{Jahr}}$ ) und
- Brennstoffkosten pro kWh Verbrennungswärme ( $b$ )

untersucht, die innerhalb der Zielfunktion das Verhältnis zwischen Investitionskosten- und Brennstoffkosten-Anteil der Stromerzeugungskosten bestimmen.

**Prozessoreinheit**

Fig.5 zeigt eine Prozessoreinheit PRZE, die geeignet ist zur Durchführung von Transformation und/oder Kompression/Dekompression. Die Prozessoreinheit PRZE umfaßt einen Prozessor CPU, einen Speicher MEM und eine



Input/Output-Schnittstelle IOS, die über ein Interface IFC auf unterschiedliche Art und Weise genutzt wird: Über eine Grafikschnittstelle wird eine Ausgabe auf einem Monitor MON sichtbar und/oder auf einem Drucker PRT ausgegeben. Eine Eingabe erfolgt über eine Maus MAS oder eine Tastatur TAST. Auch verfügt die Prozessoreinheit PRZE über einen Datenbus BUS, der die Verbindung von einem Speicher MEM, dem Prozessor CPU und der Input/Output-Schnittstelle IOS gewährleistet. Weiterhin sind an den Datenbus BUS zusätzliche Komponenten anschließbar, z.B. zusätzlicher Speicher, Datenspeicher (Festplatte) oder Scanner.

---

## Literaturverzeichnis

- [1] S. Schäffler: Global Optimization Using Stochastic Integration, Roderer-Verlag, Regensburg 1995.
  - [2] H. Ritter, T. Martinetz, K. Schulten: Neuronale Netze – Eine Einführung in die Theorie selbstorganisierender Netzwerke, Addison-Wesley, 1990.
-

## Patentansprüche

1. Verfahren zur Simulation eines technischen Systems,
    - (a) bei dem eine Zielfunktion von Parametern und vorgegebenen Einstellungskonstanten abhängt;
    - (b) bei dem abhängig von einer vorgegebenen Belegung der Parameter anhand einer Anfrage an eine externe Quelle ein Ergebnis in Form eines Einflusses der Parameter auf das technische System bestimmt wird;
    - (c) bei dem das Ergebnis zwischengespeichert wird;
    - (d) bei dem anhand des Ergebnisses und der Einstellkonstanten das technische System simuliert wird.
  2. Verfahren nach Anspruch 1,  
bei dem anhand der Simulation ein Entwurf des technischen Systems durchgeführt wird.
  3. Verfahren nach Anspruch 2,  
bei dem der Entwurf eine Anpassung, eine Veränderung oder ein Neuentwurf des technischen Systems ist.
  4. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche,  
bei dem eine erneute Bestimmung des Einflusses der Parameter auf das technische System durch Zugriff auf das zwischengespeicherte Ergebnis bestimmt wird.
  5. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche,  
bei dem für eine Vielzahl von Belegungen der Parameter jeweils deren Einfluß auf das technische System durch Anfrage an die externe Quelle ermittelt und das Ergebnis dieser Anfrage zwischengespeichert wird.
  6. Verfahren nach Anspruch 5,  
bei dem ein zusätzlicher Einfluß anhand der zwischengespeicherten Ergebnisse ermittelt wird.
- 
7. Verfahren nach Anspruch 6,  
bei dem der zusätzliche Einfluß durch Interpolation oder Extrapolation ermittelt wird.
  8. Verfahren nach Anspruch 6,  
bei dem der zusätzliche Einfluß anhand eines neuronalen Netzes anhand der Ergebnisse ermittelt wird.

9. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem die externe Quelle ein Simulator oder ein Experiment ist.
  10. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem die Simulation mit einer Vielzahl von Ergebnissen ohne die externe Quelle durchgeführt wird.
  11. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem die Simulation des technischen Systems eingesetzt wird, um eine Sensitivität von Belegungen der Parameter gegenüber Veränderungen der Einstellungskonstanten zu bestimmen.
  12. Anordnung zur Simulation eines technischen Systems, bei der eine Prozessoreinheit vorgesehen ist, die derart eingerichtet ist, daß
    - (a) eine Zielfunktion von Parametern und vorgegebenen Einstellungskonstanten abhängt;
    - (b) abhängig von einer vorgegebenen Belegung der Parameter anhand einer Anfrage an eine externe Quelle ein Ergebnis in Form eines Einflusses der Parameter auf das technische System bestimmbar ist;
    - (c) das Ergebnis zwischenspeicherbar ist;
    - (d) anhand des Ergebnisses und der Einstellkonstanten das technische System simulierbar ist.
  13. Computerprogrammerzeugnis zur Simulation eines technischen Systems, das bei Ausführung auf einer Prozessoreinheit die folgenden Schritte umfaßt:
    - (a) eine Zielfunktion hängt von Parametern und vorgegebenen Einstellungskonstanten ab;
    - (b) abhängig von einer vorgegebenen Belegung der Parameter anhand einer Anfrage an eine externe Quelle wird ein Ergebnis in Form eines Einflusses der Parameter auf das technische System bestimmt;
    - (c) das Ergebnis wird zwischengespeichert;
    - (d) anhand des Ergebnisses und der Einstellkonstanten wird das technische System simuliert.
-

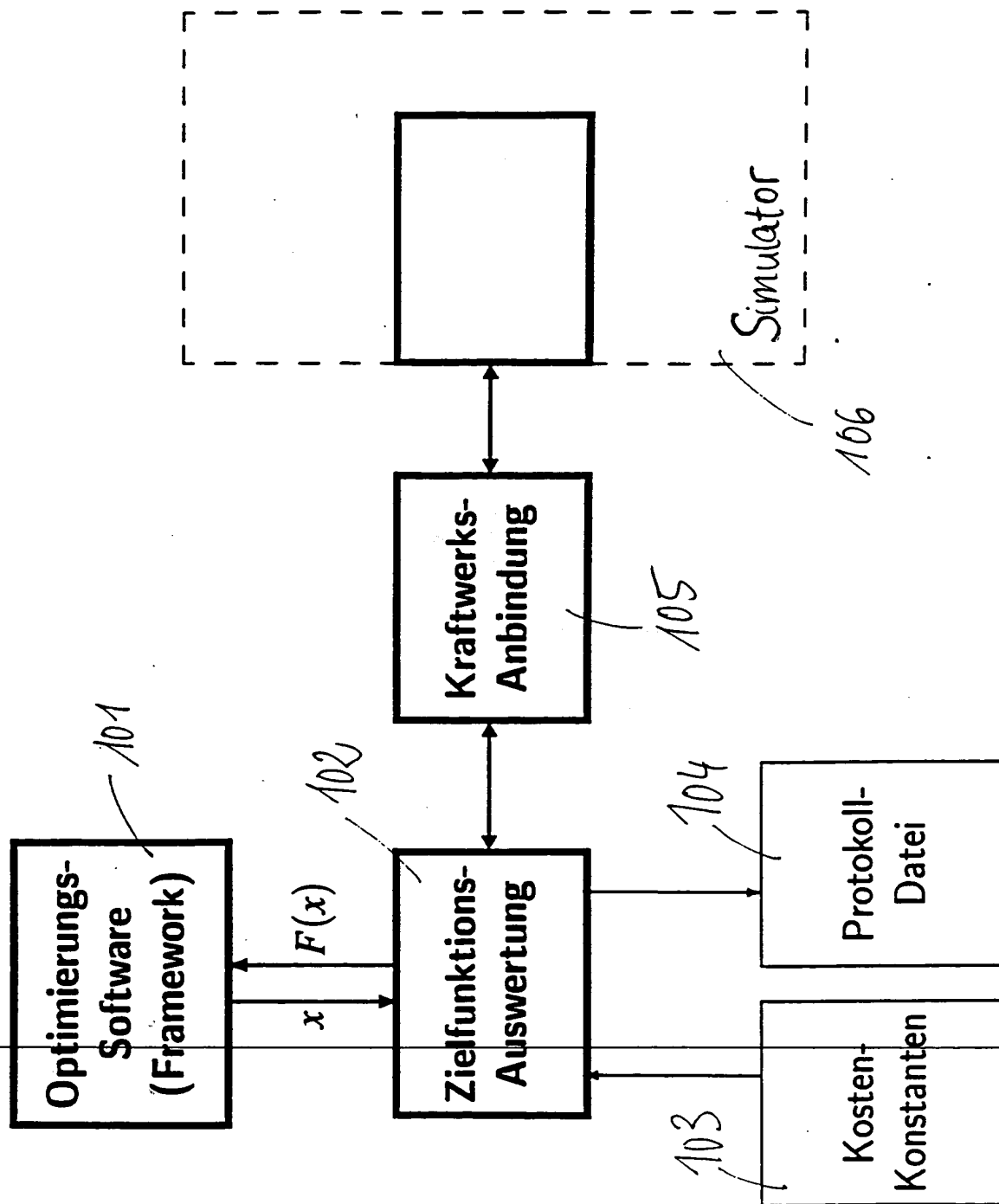
## **Zusammenfassung**

### **Verfahren, Anordnung und Computerprogramm-Erzeugnis zur Simulation eines technischen Systems**

Es wird ein Verfahren zur Simulation eines technischen Systems angegeben, bei dem eine Zielfunktion von Parametern und vorgegebenen Einstellungskonstanten abhängt. Abhängig von einer vorgegebenen Belegung der Parameter wird anhand einer Anfrage an eine externe Quelle ein Ergebnis in Form eines Einflusses der Parameter auf das technische System bestimmt. Das Ergebnis wird zwischengespeichert. Anhand des Ergebnisses und der Einstellkonstanten wird das technische System simuliert.

---

FIG 1



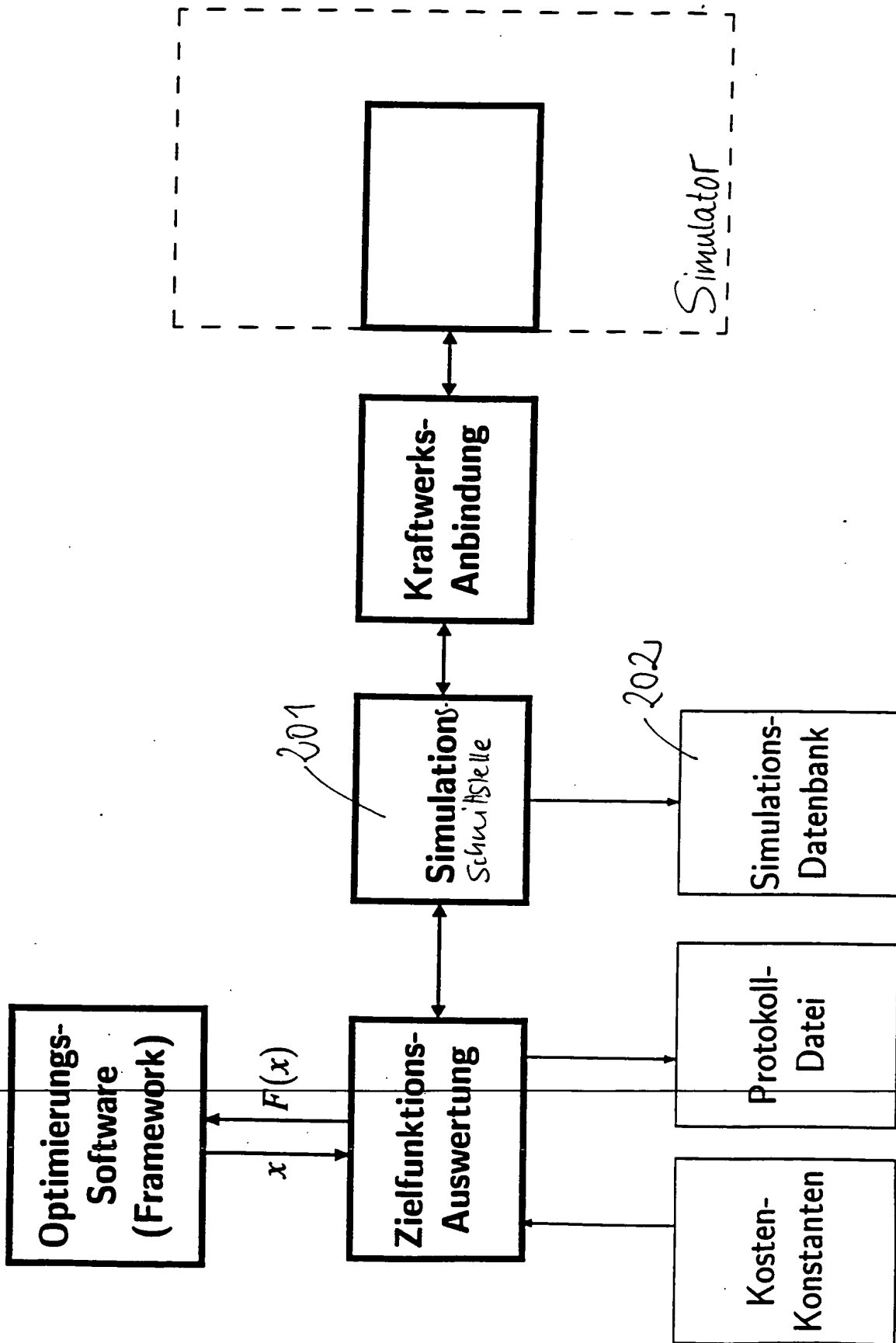
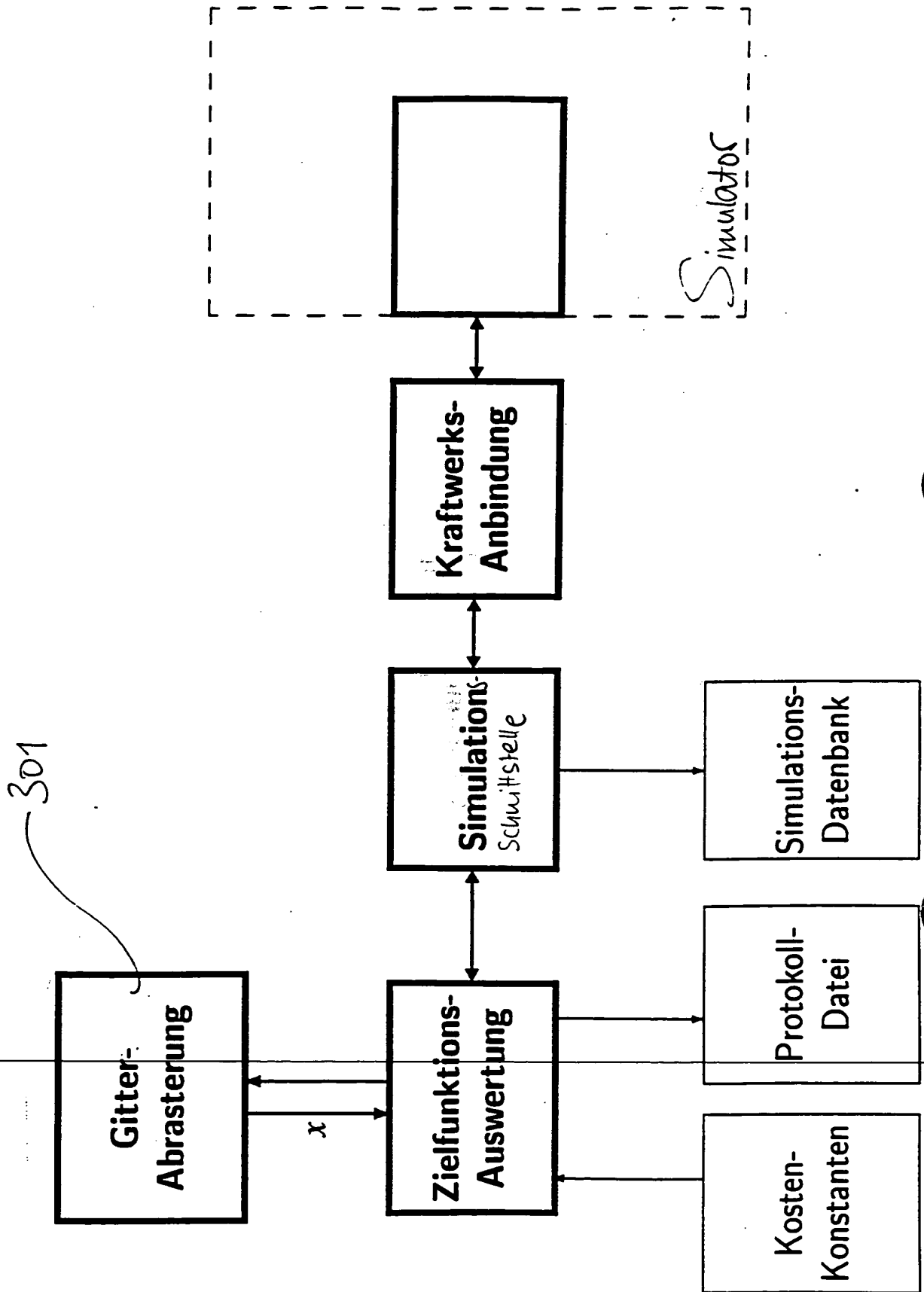


FIG. 2

FIG 3





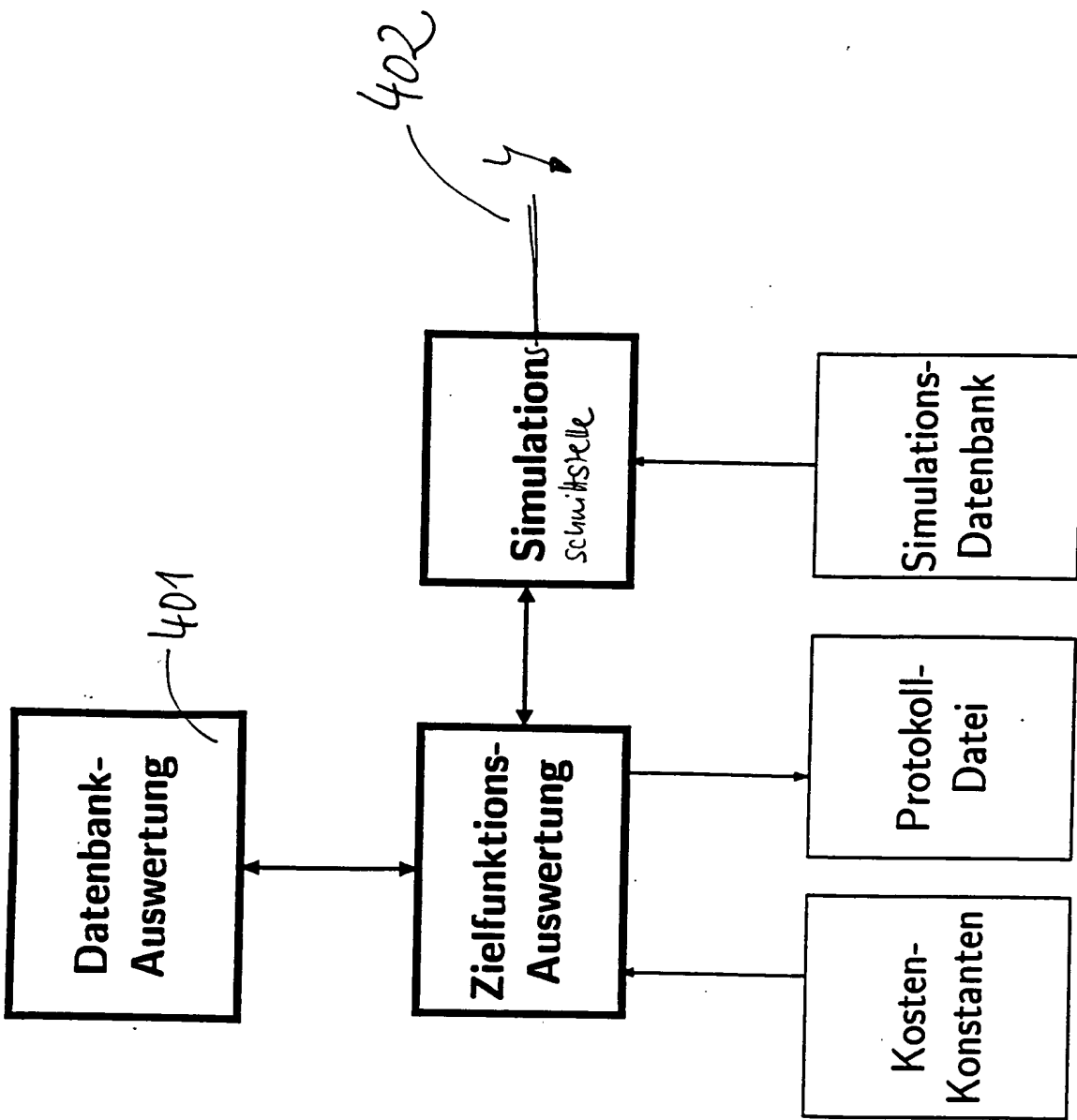


FIG 4

FIG 5

